

# 多車線道路に対応した2段階音響車両検出システムの 初期的評価

内野 雅人<sup>1,a)</sup> 石田 繁巳<sup>1</sup> 田頭 茂明<sup>2</sup> 荒川 豊<sup>1</sup> 福田 晃<sup>1</sup>

概要：ITS (Intelligent Transportation System: 高度道路交通システム) の重要度は年々高まっており、道路上を走行する車両の検出は ITS における重要なタスクの 1 つとなっている。筆者らは、マイクロフォンを用いた低コストな車両検出システムの開発を行っている。道路横の歩道に設置した 2 台のマイクロフォンが受信した車両走行音の時間差を描いた「サウンドマップ」に対して車両移動を示すカーブをフィッティングすることで車両を検出する車両検出システム SAVeD をこれまでに開発した。本稿では車両検出システム SAVeD を拡張し、多車線道路に対応した 2 段階車両検出システムを提案する。交通量の多い環境下では、短い時間に複数の車両が連続・同時に通過し、サウンドマップ上に描かれる車両情報が干渉することで検出精度が低下する。そこで、サウンドマップ上でのフィッティングを 2 段階に分け、Pre Fitting で推定した情報に基づいて検出範囲を狭めた上で Post Fitting 処理、近傍点抽出処理を施すことで車両検出精度を向上させる。片側 2 車線、合計 4 車線の道路において提案システムの実証評価を行った結果、既存手法よりも 12% 高い F 値 0.63 という精度で車両を検出できることを確認した。

キーワード：車両検出、音響センシング、サウンドマップ、フィッティング

## 1. はじめに

近年の道路交通の発展に伴い、ITS (Intelligent Transportation System) の重要性が高まっている。ITS の主な目的は、情報技術を用いて道路交通の安全性、機能性、効率を向上させることであり、その活用例として、交通渋滞を考慮したカーナビゲーションシステムや運転支援システム、自動運転システムなどが挙げられる。

ITS において、道路上を走行する車両の検出は道路の交通状況を把握する上で必要不可欠である。筆者らは、低コストなリアルタイム車両検出の実現を目指してマイクロフォンを用いた車両検出システムの開発を進めている [1]~[3]。このシステムでは道路横の歩道上に設置した 2 台のマイクロフォンを用いて車両走行音の受信時間差を「サウンドマップ」として描く。サウンドマップ上には車両の移動とともに S 字カーブが描かれるため、S 字カーブをカーブフィッティングして検出することで車両を検出する。これまでに片側 1 車線道路にて様々な気象条件・交通条件での実証評価を行い、高精度での車両検出が可能であることを確

認した。

しかしながら、マイクロフォンを用いた車両検出システムは交通量の多い道路において検出精度が低下するという問題がある。交通量の多い環境下においては短時間に複数台の車両が連続・同時にマイクロフォンの前を通過する。そのため、車両の検出を行うフィッティング範囲内に複数台の車両の S 字カーブが混在し、互いに干渉することで検出が困難となる。

このような問題の解決に向け、本稿では 2 段階車両検出システムを示す。2 段階車両検出システムではカーブフィッティングを 2 段階に分離し、第 1 段階の Pre Fitting の結果から車両の速度、通過時刻を推定し、これらに基づいて定めた時間範囲のみに着目して 2 段階目の Post Fitting を行う。Post Fitting 後にフィッティングカーブに近接するサウンドマップ点群のみを抽出した上で検出処理を行うことで、他の車両の影響を軽減する。

片側 2 車線、合計 4 車線の福岡県道において車両の走行音を取得し、2 段階車両検出システムの実証評価を行った。その結果、既存手法による検出に比べて 11% 高い F 値 0.63 という精度で車両を検出できることを確認した。

本稿の構成は以下の通りである。2. では文献 [1] で示した車両検出システム SAVeD の概要及び多車線道路における課題を示す。3. で提案する 2 段階車両検出システムを示し、4. で 2 段階車両検出システムの評価を行う。5. で関連

<sup>1</sup> 九州大学大学院システム情報科学研究科 〒 819-0395 福岡市西区元岡 744

Faculty of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University

<sup>2</sup> 関西大学総合情報学部 〒 569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町 2-1-1 Faculty of Informatics, Kansai University

<sup>a)</sup> uchino@f.ait.kyushu-u.ac.jp

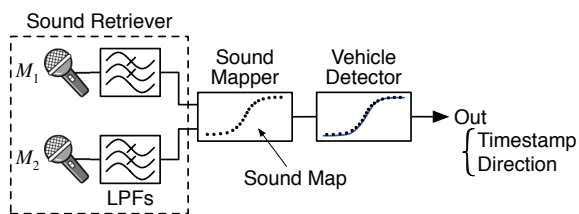


図1 車両検出システム SAVeD の概要 [1]

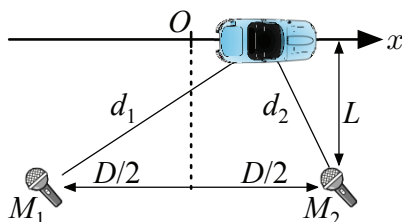


図2 マイクロフォンの設置状態 [1]

研究について述べ、最後に6.でまとめとする。

## 2. マイクロフォンを用いた車両検出システム SAVeD

### 2.1 SAVeD の概要

図1に、マイクロフォンを用いた車両検出システム SAVeD の概要を示す [1]。車両検出システム SAVeD は、走行音取得ブロック (Sound Retriever)、サウンドマップ描画ブロック (Sound Mapper)、車両検出ブロック (Vehicle Detector) の3つのブロックから構成される。

走行音取得ブロックは2台のマイクロフォンとLPF (Low-Pass Filter) を接続したものである。道路横の歩道に設置された2台のマイクロフォンで車両の走行音を受信する。2台のマイクロフォンに接続されているLPFは車両走行音以外の雑音の影響を軽減するために利用される。走行する車両から発せられるタイヤの音の主成分は2.0kHz以下であるため [4], [5], 受信した走行音にはカットオフ周波数2.5kHzのLPFを適用する。

サウンドマップ描画ブロックでは2台のマイクロフォンの走行音の受信時間差を算出し、受信時間差が時刻とともにどのように変化したかを示す「サウンドマップ」を描く。車両が一定速度  $v$  で2台のマイクロフォンの前を通過する場合、サウンドマップ上にはS字カーブが描かれる。図2のようにマイクロフォンを設置した場合、走行音の受信時間差  $\Delta t$  は走行音が各マイクロフォンに到達するまでの距離  $d_1, d_2$  から以下のように求められる。

$$\begin{aligned} \Delta t &= \frac{d_1 - d_2}{c} \\ &= \frac{1}{c} \left\{ \sqrt{\left[ v(t - t_0) + \frac{D}{2} \right]^2 + L^2} \right. \\ &\quad \left. - \sqrt{\left[ v(t - t_0) - \frac{D}{2} \right]^2 + L^2} \right\} \quad (1) \end{aligned}$$

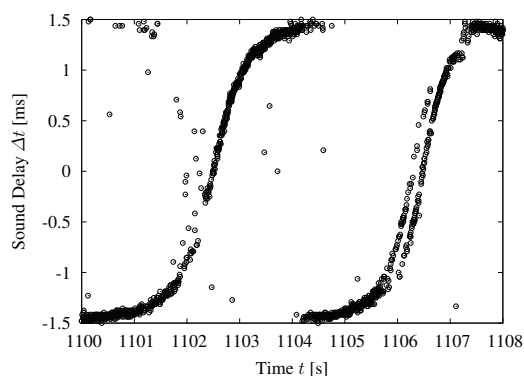


図3 サウンドマップの例

ここで、 $t_0$  は車両がマイクロフンの前を通過する時刻、 $c$  は音速である。式 (1) より、 $v$  が一定であればサウンドマップ上にS字カーブが描かれることが分かる。

図3はサウンドマップの例を示している。図3より、左から右に計2台の車両が通過していることが分かる。S字カーブの向きは車両の進行方向、すなわち  $v$  の符号によって定まる。

車両検出ブロックではロバスト推定手法RANSAC (Random Sample Consensus) [6] を用いてサウンドマップ上のS字カーブを検出する。式 (1) における未知のパラメータは速度  $v$  および車両通過時刻  $t_0$  であるため、サウンドマップ上の点群のうち尤もらしいものに式 (1) をフィッティングすることで  $v$  および  $t_0$  を推定する。各時刻における車両を検出するためサウンドマップを固定時間長のウィンドウで区切り、各ウィンドウでフィッティングを行って逐次的に車両を検出する。

RANSACではサウンドマップ上の点群を用いて「尤もらしい」S字カーブにフィッティングするため、車両がない場合にもフィッティングが完了する。このため、フィッティングで得られたS字カーブとサウンドマップ点群との距離の総和が閾値を下回る場合に車両が通過したと判定する。車両を検出した場合にはフィッティング結果のS字カーブに近接するサウンドマップ点群を消去し、後続車両の検出への影響を軽減する。

### 2.2 多車線道路における問題点

マイクロフォンを用いた車両検出システムを多車線道路に適用する場合、多数の車両がほぼ同時、あるいは連続してマイクロフォン前を通過する。このため、フィッティング後のサウンドマップ点群消去時に未消去、過消去という2つの問題が発生し、検出精度が低下する。

#### (1) 未消去

未消去は、検出したS字カーブに近接するサウンドマップ点群の消去において車両に対応する点群を消去しきれずに後続車両の検出に影響を及ぼす問題である。図4(a)に未消去問題の例を示す。図中の点はサウンドマップ点群、赤い四角は検出処理のウィンドウ、青い線はフィッティン

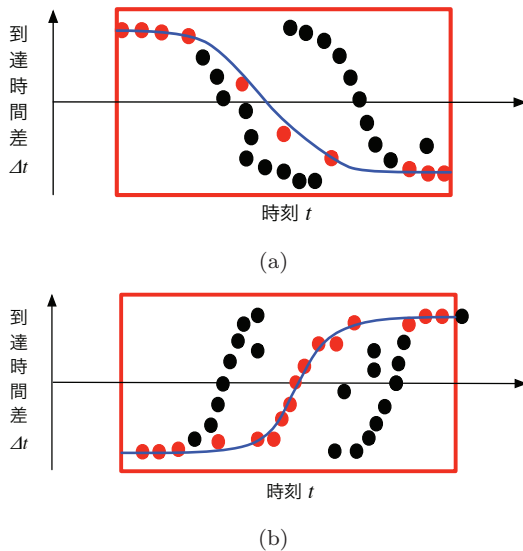


図 4 多車線道路での車両検出における (a) 未消去問題, (b) 過消去問題の例

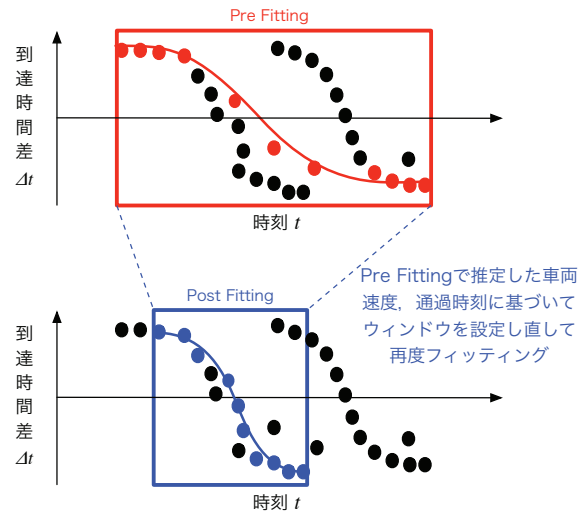


図 6 Post Fitting の概要

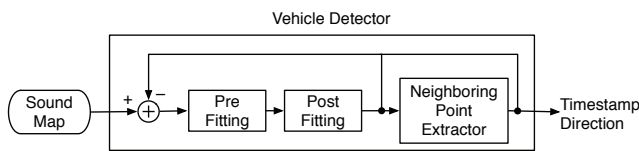


図 5 2段階車両検出システムにおける検出ブロックの概要

結果の S 字カーブ, 赤い点は S 字カーブに近接して消去される点群を示している。多車線道路では複数車両が連続して通過するケースが多く, 図に示すように誤って複数車両の S 字カーブにまたがって S 字カーブをフィッティングしてしまう場合がある。このような場合には実際の通過車両に対応するサウンドマップ点群が消去されずに多数残ってしまい, 後続車両の検出に干渉して検出精度が低下する。

## (2) 過消去

過消去は, 検出した S 字カーブに近接するサウンドマップ点群の消去において検出した車両以外の車両に対応するサウンドマップ点群を消去してしまい後続車両の検出に影響を及ぼす問題である。図 4 (b) に, 過消去問題の例を示す。多車線道路では複数車両が連続して通過するケースが多く, ウィンドウ内で多数の車両が連続して通過する状況が想定される。この場合, 図に示すように検出車両の前後車両に対応するサウンドマップ点群を含んで S 字カーブが推定される場合がある。このとき前後車両に対応するサウンドマップ点群が消去されてしまい, 後続車両の検出が困難となる。

## 3. 2段階車両検出システム

### 3.1 概要

多車線道路における車両検出精度向上に向け, 図 1 の車両検出ブロックに変更を加える。図 5 に, 2段階車両検出システムにおける車両検出ブロックの概要を示す。抽出型車両

検出ブロックは Pre Fitting ブロック, Post Fitting ブロック, 近傍点抽出ブロック (Neighboring Point Extractor) で構成される。

まず, Pre Fitting ブロックではあらかじめ定められたウィンドウ幅で 2 章と同様に RANSAC を用いたカーブフィッティングを行い, 車両を検出する。車両が検出された場合には車両の速度及び通過時刻を推定し, 車両速度及び通過時刻を Post Fitting ブロックに送信する。Post Fitting ブロックでは車両速度及び通過時刻に基づいて車両通過時刻付近に新たにウィンドウを定め, このウィンドウ内の点群のみを用いて再度カーブフィッティングを行う。近傍点抽出ブロックでは, Post Fitting 結果で得られたカーブに近接する点群のうち車両検出時刻に近いものを抽出して車両の有無を判定する。車両を検出した場合にはカーブに近接する点群をサウンドマップ上から消去した上で検出処理を繰り返す。

Pre Fitting ブロックの検出処理は 2.1 節に示した通りであるため, 以降では Post Fitting ブロックと近傍点抽出ブロックについて詳述する。

### 3.2 Post Fitting ブロック

図 6 に Post Fitting の概要を示す。Post Fitting では, Pre Fitting で得られた推定速度  $\tilde{v}$  及び推定車両通過時刻  $\tilde{t}_0$  に基づいて動的にウィンドウ幅を定め, この動的ウィンドウ内の点群を用いてフィッティングを行う。Pre Fitting において粗推定された S 字カーブに基づいてウィンドウ幅を定めてからフィッティングを行うことで精密なカーブフィッティングが可能となり, サウンドマップ点群によりマッチする S 字カーブを推定できる。このとき, Post Fitting と Pre Fitting の結果が大きく乖離している場合には検出失敗とみなし, 次のウィンドウでの検出処理を続行する。

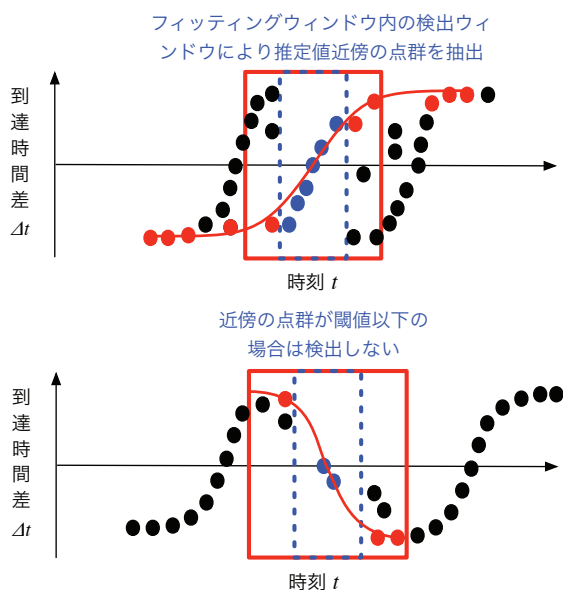


図 7 近傍点抽出の概要

### 3.3 近傍点抽出ブロック

近傍点抽出ブロックでは、Post Fitting で得られた S 字カーブに近接するサウンドマップ点群のうち、推定車両通過時刻近傍の点群を抽出して車両の有無を判定する。推定車両通過時刻近傍のサウンドマップ点群は、マイクロフォンの目の前、すなわちマイクロフォンに最も近い場所を車両が通過した際の走行音に基づくものであり、音の大きさが大きいことから多数の点群が得られる。そこで、S 字カーブにマッチする点群が推定車両通過時刻近傍に十分な個数存在する場合に車両が通過したと判定する。

図 7 に近傍点抽出の概要を示す。マイクロフォン前を多数の車両が通過する場合には各車両に対応するサウンドマップ点群の絶対数が少なくなるため、S 字カーブにマッチする点群の絶対数ではなく、相対的な個数を用いて車両の有無を判定する。図 7 の赤枠及び青枠で示すフィッティングウィンドウ、検出ウィンドウの 2 つのウィンドウを定め、フィッティングウィンドウ内で S 字カーブにマッチする点群の数に対する検出ウィンドウ内でマッチする点群の割合が閾値を超えた場合に車両が通過したと判定する。本稿では実験的に 0.4 を閾値として設定した。車両を検出した場合には 2.1 章で示した SAVeD と同様に検出車両の S 字カーブにマッチする点群をサウンドマップ上から消去した上で検出処理を続行する。

図 8 は提案する 2 段階車両検出によって削減できた誤検出の例を示している。図中の青い点はサウンドマップ点群、オレンジの線はフィッティングによって推定された S 字カーブ、赤い点は S 字カーブに近接して消去されるサウンドマップ点群を示している。図 8 (a) に示すように、先行方式の SAVeD では連続で通過した車両のサウンドマップ点群にまたがって S 字カーブが推定され、未消去が発生している。また、推定車両以外の点群を過消去したことにより後続車両の未検出が発生している。一方、2 段階車両検

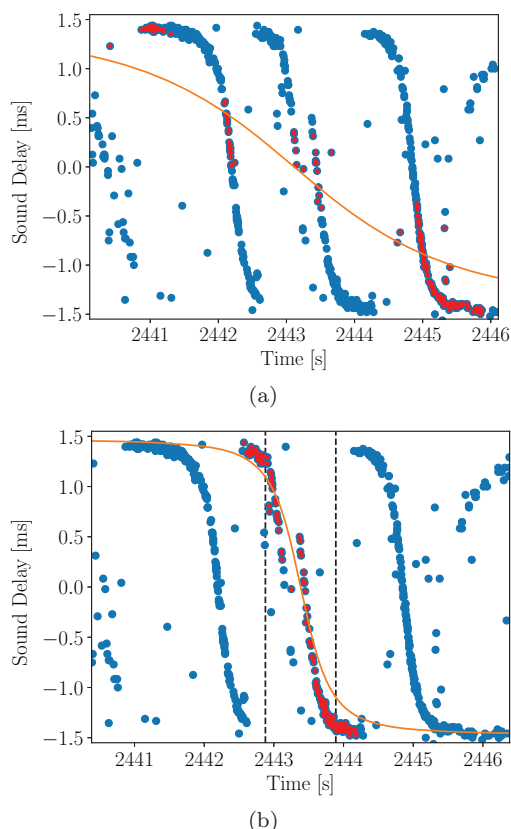


図 8 2 段階車両検出によって削減できた誤検出の例: (a) SAVeD で発生する誤検出及び未消去・過消去問題, (b) 2 段階車両検出の結果

出方式では図 8 (b) に示すように適切な S 字カーブが推定され、1 台の車両に対応するサウンドマップ点群が消去されることが分かる。図中の点線は近傍点抽出ブロックにおける検出ウィンドウを示しており、Post Fitting 時に車両速度に応じてウィンドウ幅が適切に設定されていることが分かる。図には示していないが、前後の 2 台の車両についても S 字カーブがそれぞれ正しくフィッティングされ、正しく検出できることを確認している。

## 4. 評価

提案する 2 段階車両検出システムの有効性を検証するため、福岡県道 567 号線において取得した車両走行音データを用いて車両検出性能の初期的評価を行った。

### 4.1 評価環境

図 9 に評価環境を示す。対象の道路は片側 2 車線、合計 4 車線の道路である\*1。道路の片側の歩道上に 2 台の AZDEN 社製 SGM-990 マイクロフォンを道路と並行に設置し、走行音を約 60 分間収集した。走行音の収集は SONY 社製 PCM-D100 サウンドレコーダで行い、評価時の気象状況を Nielsen-Kellerman 社製 Kestrel 5500 気象計で測定

\*1 図 9 には片側 3 車線の道路が写っているが、マイクロフォンの前では片側 2 車線であることから本評価は片側 2 車線道路で行ったものとしている。マイクロフォンよりも写真奥方向で右折専用車線が分岐したために片側 3 車線に見える写真となっている。

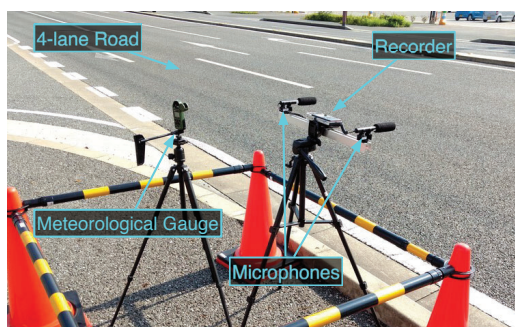


図 9 評価環境

した．また，対象道路を俯瞰できる位置から SONY 社製 HDR-MV1 ビデオレコーダで道路を撮影し，車両通過時刻の真値を手動でラベル付けした．走行音はサンプリングレート 48 kHz，量子化ビット数 16 bit で記録した．2 台のマイクロフォン間の距離，高さは文献 [1] と同様にそれぞれ 50 cm，1 m である．走行音を取得した約 60 分間で合計 609 台の車両が通過した．走行音データ取得時の平均風速は 1.26 m/s であった．

評価には混合行列を用い，検出性能を相対的に評価するために 2 段階車両検出システムと既存方式 SAVeD とで検出性能を比較した．どの車線を走行しているかは推定せず，車両の進行方向を区別しながら通過した車両が検出されたかどうかを評価した．検出した車両の推定通過時刻と最も近い時刻に通過した車両の通過時刻との差が許容通過時刻誤差  $\theta_t$  よりも小さい場合に正しい検出であると判定した．実際に車両が通過した時にシステムが車両を検出したときを True Positive (TP)，実際には車両が通過したにも関わらず検出をしなかったときを False Negative (FN)，実際には車両が通過していないにも関わらず検出したときを False Positive (FP) としてその回数を数えた．TP, FN, FP の回数を用いて以下で定める精度 (Precision)，網羅率 (Recall)，F 値 (F-measure) をそれぞれ算出した．

$$\text{精度} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2)$$

$$\text{網羅率} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3)$$

$$\text{F 値} = \frac{2 \cdot (\text{精度}) \cdot (\text{網羅率})}{(\text{精度}) + (\text{網羅率})} \quad (4)$$

#### 4.2 車両検出性能

表 1 に，許容車両通過誤差  $\theta_t = 1.5\text{s}$  としたときの TP, FN, FP の回数及びこれらを用いて算出した精度，網羅率，F 値を示す．表は通過車両の方向別の結果を示している．表 1 から以下の 4 つのことがわかる．

- 2 段階車両検出システムの精度は SAVeD に比べて 14% 高い 76% であった．近傍点抽出ブロックにおいて Pre Fitting での推定車両速度に応じた検出ウィンドウを設定し，Post Fitting での推定車両通過時刻の近傍のみの点群を抽出した上で車両を検出することで False Positive を削減できたと考えられる．

表 1 車両検出性能の評価結果

(a) 2 段階検出 (提案) 方式

	左から右	右から左	合計
TP	142	183	325
FN	156	128	284
FP	27	75	102
精度	0.84	0.71	0.76
網羅率	0.48	0.59	0.53
F 値	0.61	0.64	0.63

(b) 既存方式 SAVeD

	左から右	右から左	合計
TP	133	132	265
FN	165	179	344
FP	81	80	161
精度	0.62	0.62	0.62
網羅率	0.45	0.42	0.44
F 値	0.52	0.50	0.51

- 2 段階車両検出システムの網羅率は SAVeD に比べて 9% 高い 53% であった．Post Fitting ブロックにおいて Pre Fitting での推定車両速度に応じたウィンドウでカーブフィッティングを行うことで，1 台の車両に対応するサウンドマップ点群をフルに活かした検出が可能となり，False Negative が減少したと考えられる．
- 2 段階車両検出システムの F 値は SAVeD に比べて 12% 高い 63% であった．しかしながら，2 段階車両検出システム，SAVeD とともに精度に比べて網羅率が低いため精度に比べて低い F 値となっている．サウンドマップ上の点群は各時刻で 1 点のみが描かれるため，ほぼ同時に通過する車両数の増加とともに 1 台の車両に対応するサウンドマップ点群の数が減少する．この結果サウンドマップが粗くなり，False Negative が発生していると考えられる．
- 左から右方向へ通過する車両に対しては 2 段階車両検出システムによって FP が SAVeD と比べて 1/3 に削減され，精度が 22% 向上している．Pre Fitting, Post Fitting によってウィンドウ幅が適切に設定されることで FP を削減できたと考えられる．一方で，右から左方向への通過車両に対しては FP があまり削減されていない．右から左へ通過する車両はマイクロフォンに近い車線を走行する車両であり，式 (1) における  $L$  が小さいために S 字カーブの幅が小さくなる．このため，固定のウィンドウ幅を使っている Pre Fitting における推定車両速度が実際の速度と大きく異なるものとなり，Post Fitting においてウィンドウ幅を再設定する効果が小さくなったためと考えられる．

以上の結果から，片側 2 車線，合計 4 車線で交通量の多い環境下においても 2 段階車両検出システムを用いることで道路の片側から F 値 63% で車両を検出できることが確認された．

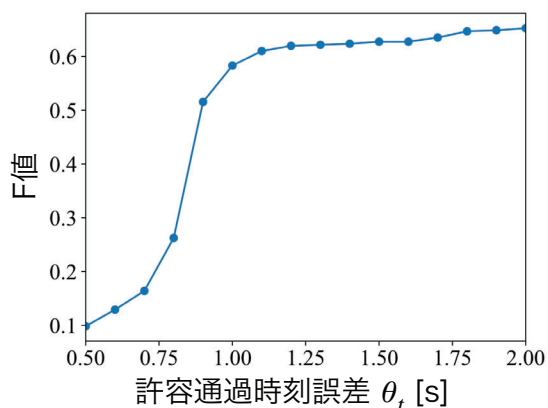
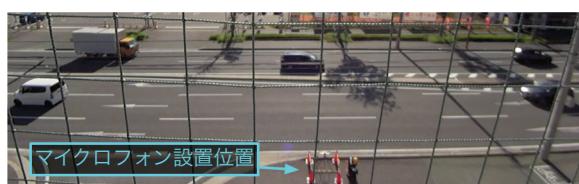
図 10 許容通過時刻誤差  $\theta_t$  に対する F 値

図 11 真値記録のビデオ映像の 1 シーン

#### 4.3 許容通過時刻誤差に対する検出性能

Post Fitting ブロックにおけるフィッティングにズレがある場合にはシステムの検出した車両の推定通過時刻に誤差が生じる。4.1 で述べたようにこの誤差が許容通過時刻誤差  $\theta_t$  よりも大きい場合には検出は False Positive であると判定されるため、小さすぎる許容通過時刻誤差  $\theta_t$  は F 値の低下を招く。適切な許容通過時刻誤差の設定に向け、許容通過時刻誤差が検出性能に与える影響を検証した。

図 10 に、許容通過時刻誤差  $\theta_t$  を 0.5~2.0s まで変化させた場合の F 値を示す。F 値は  $\theta_t$  の増加とともに増加し、 $\theta_t > 1.2$  では約 0.6 で飽和していることが分かる。このことから、許容通過時刻誤差を  $\theta_t > 1.2$  の範囲で設定すれば良いことが分かる。許容通過時刻誤差が大きすぎる場合には検出した車両とは異なる車両の通過にマッチして正しい検出と判定されてしまうため、F 値が飽和した範囲で小さい許容通過時刻誤差を設定すれば良いと言える。

検出時刻の誤差は、主に真値の時刻誤差に起因していると考えられる。図 11 は真値を取得するために記録したビデオ映像の 1 シーンを示している。図の下部、中央付近に写る赤いコーンがマイクロフォンを設置してある位置である。図に示すように、撮影場所の制約によりマイクロフォン設置位置の正面にビデオカメラを設置することができなかった。このために真値のラベル付けにおける車両通過時刻は斜めから見た画角のビデオ映像に基づく目測値となり、誤差が生じたと考えられる。また、実験に使用した機材の制約によりビデオカメラとマイクロフォンは自動的に同期されておらず、実験実施者が合図をして開始時刻を同期した。これらの誤差が大きな検出時刻誤差を生じたと

考えられる。

## 5. 関連研究

マイクロフォンを用いた車両検出システムにおいて多車線道路への適用を考慮している研究は筆者らの調査した範囲では報告されていない。本節では車両検出システムの関連研究を音響センサを用いないものと用いるものに分けて概観する。

### 5.1 音響センサを用いない車両検出システム

音響センサを用いない車両検出システムは大きく分けて埋没型と非埋没型に分類できる [7]。

埋没型は、車両検出のためのセンサを道路に直接埋め込み車両の通過を検出する。埋没型の車両検出システムの例としては、ループコイルや磁気センサを利用しているものが一般的である。埋没型車両検出システムはセンサ自体がダメージを受ける機会が少ないためにメンテナンスのコストを削減でき、寿命も長い。しかし、1つのセンサでは車両検出範囲が狭く、道路に適用する場合には複数のセンサを埋没する必要がある。また埋没型車両検出システムは設置のために一時的に道路を封鎖して埋没工事が必須であり、道路工事に多くのコストが必要となる。

非埋没型の車両検出システムの例としては、赤外線センサや超音波センサを使用しているものが一般的である。非埋没型車両検出システムは道路上部や側面から赤外線や超音波を射出し、射出範囲を通過する車両の検出を行う。埋没型よりもセンサ 1 つあたりの車両検出範囲は広いが、上部設置のためにポールやアームの設置が不可欠であり、安全性を担保するための落下防止対策も必須である。実際に運用されている超音波センサを用いた車両センサの導入には 1 箇所あたり約 1,000 万の費用を要することが報告されている [8]。側面設置では遮蔽された範囲の検出ができないため、多車線道路への適用は困難である。

設置・運用コストの低い車両検出システムとして、すでに設置されている CCTV (Closed-Circuit Television) カメラを用いたカメラベースの車両検出システムが提案されている [9]~[11]。しかし、この手法は CCTV が設置されているバイパスや高速道路などにしか適用できないという問題がある。また、カメラベースの車両検出システムの検出精度はカメラの角度や設置位置に依存するため、設置角度を変更できない CCTV では精度を担保することが難しい。

### 5.2 音響センサを用いた車両検出システム

音響センサを用いた車両検出システムでは道路横に設置した 2 台以上のマイクロフォンで複数車線の車両の検出を行う。可聴音は車両の大きさに比べて波長が大きいため、音の回折によりマイクロフォンと車両の間に別の車両がいる場合にも走行音の一部がマイクロフォンに到達する。そのため、設置における場所の制約を受けづらいという利点

がある。また、低コストでの設置・運用が可能であるという点で道路交通モニタリングに有用である。

音響センサを用いて車両の走行音を取得し、車両の検出を行う研究はこれまでにいくつか報告されている。ForrenとChenらはマイクロフォン・アレイを用いた交通モニタリング手法を報告している[12]~[15]。マイクロフォン・アレイにより車両走行音を受信し、その受信時間差を示した「サウンドマップ」上の波形を解析することで車両の交通状況をモニタリングする。しかし、サウンドマップの解析を自動的に行う手法については示されておらず、車両検出システムとしての性能は不明である。

筆者らはサウンドマップの自動解析手法について研究を進めてきた。文献[16]~[18]では、サウンドマップをステートマシンベースのアルゴリズムやDTW (Dynamic Time Warping) によるテンプレートマッチングによって解析することで車両を検出する手法を報告した。また、文献[1]ではロバスト推定手法RANSACを用いた車両検出手法を報告した。低消費電力での検出手法[19]や風の影響を考慮した検出手法[2]、雨の影響を考慮した検出手法[3]なども報告したが、多車線道路のように多数の車両がほぼ同時あるいは連続して通過する場合に検出精度が大幅に低下するという問題がある。

## 6. おわりに

本稿では、多数の車両がほぼ同時または連続して通過する多車線道路に適用可能な、マイクロフォンを用いた車両検出システムを示した。本システムでは2台のマイクロフォンを道路横の片側の歩道に設置し、マイクロフォンが車両走行音を受信する時間差が時刻とともに変化する様子を描いた「サウンドマップ」を描画する。車両が通過した場合にはサウンドマップ上にS字カーブが描かれることから、サウンドマップを2段階に分けて解析し、ほぼ同時または連続して車両が通過する環境下でも単一の車両を区別して検出することを可能とした。2段階車両検出システムを実装して片側2車線、合計4車線の福岡県県道において実証評価を行った結果、既存手法と比べて12%高いF値0.63という精度で車両を検出できることを確認した。

謝辞 本稿で示した研究の一部は、科研費(JP15H05708, JP17H01741, JP18K18041)の助成で行われた。

## 参考文献

[1] Ishida, S., Kajimura, J., Uchino, M., Tagashira, S. and Fukuda, A.: SAVeD: Acoustic Vehicle Detector with Speed Estimation capable of Sequential Vehicle Detection, *Proc. IEEE Conf. Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pp. 906–912 (2018).

[2] Uchino, M., Ishida, S., Kubo, K., Tagashira, S. and Fukuda, A.: Initial Design of Acoustic Vehicle Detector with Wind Noise Suppressor, *Proc. Int. Workshop on Pervasive Computing for Vehicular Systems (Per-Vehicle)*, pp. 814–819 (2019).

[3] Ishida, S., Uchino, M., Li, C., Tagashira, S. and Fukuda, A.: Design of Acoustic Vehicle Detector with Steady-Noise Suppression, *Proc. IEEE Conf. Intelligent Transportation Systems (ITSC)* (2019). (accepted).

[4] Wu, H., Siegel, M. and Khosla, P.: Vehicle Sound Signature Recognition by Frequency Vector Principal Component Analysis, *Proc. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conf. (IMTC)*, Vol. 1, pp. 429–434 (1998).

[5] 花塚泰史：時間整合アルゴリズムに基づくタイヤ振動解析法—リアルタイム路面状態判別システムの開発—, 博士論文, 総合研究大学院大学 (2012).

[6] Fischler, M. A. and Bolles, R. C.: Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography, *Commun. ACM*, Vol. 24, No. 6, pp. 381–395 (1981).

[7] 井坪慎二, 塚田幸広：情報機器の道路交通調査への適用に関する検討, 土木技術資料, Vol. 47, No. 8, pp. 56–61 (2005).

[8] 東 俊孝, 高田知典, 井坪慎二, 内田 淳：道路交通センサのための次世代情報収集システムの開発, 土木情報システム論文集, Vol. 15, pp. 103–110 (2006).

[9] 遠藤正樹, 川原克美, 今井ひとみ：CCTVを活用した新たな交通データ取得システムの提案, 国交省北陸地方整備局事業研究発表会資料集, pp. 1–4 (2007).

[10] Buch, N., Cracknell, M., Orwell, J. and Velastin, S. A.: Vehicle Localisation and Classification in Urban CCTV Streams, *Proc. ITS World Congress*, pp. 1–8 (2009).

[11] Nurhadiyah, A., Hardjono, B., Wibisono, A., Jatmiko, W. and Mursanto, P.: ITS Information Source: Vehicle Speed Measurement Using Camera as Sensor, *Proc. Int. Conf. on Advanced Computer Science and Information Systems (ICACSIS)*, pp. 179–184 (2012).

[12] Forren, J. F. and Jaarsma, D.: Traffic Monitoring by Tire Noise, *Proc. IEEE Conf. Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pp. 177–182 (1997).

[13] Chen, S., Sun, Z. P. and Bridge, B.: Automatic traffic monitoring by intelligent sound detection, *Proc. IEEE Conf. Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pp. 171–176 (1997).

[14] Chen, S., Sun, Z. and Bridge, B.: Traffic monitoring using digital sound field mapping, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Vol. 50, No. 6, pp. 1582–1589 (2001).

[15] Barbagli, B., Manes, G., Facchini, R. and Manes, A.: Acoustic sensor network for vehicle traffic monitoring, *Proc. IEEE Int. Conf. on Advances in Vehicular Systems (VEHICULAR)*, pp. 1–6 (2012).

[16] Ishida, S., Mimura, K., Liu, S., Tagashira, S. and Fukuda, A.: Design of Simple Vehicle Counter using Sidewalk Microphones, *Proc. ITS EU Congress*, EU-TP0042, pp. 1–10 (2016).

[17] 石田繁巳, 三村晃平, 劉 嵩, 田頭茂明, 福田 晃：路側設置マイクロフォンによる車両カウントシステム, 情報処理学会論文誌, Vol. 58, No. 1, pp. 89–98 (2017).

[18] Ishida, S., Liu, S., Mimura, K., Tagashira, S. and Fukuda, A.: Design of Acoustic Vehicle Count System using DTW, *Proc. ITS World Congress*, AP-TP0678, pp. 1–10 (2016).

[19] Kubo, K., Li, C., Ishida, S., Tagashira, S. and Fukuda, A.: Design of Ultra Low Power Vehicle Detector utilizing Discrete Wavelet Transform, *Proc. ITS AP Forum*, pp. 1052–1063 (2018).